Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety
Research Paper
Vol. 29, No. 7, pp. 770-778, December 31, 2023, ISSN 1229-3431(Print) / ISSN 2287-3341(Online) https://doi.org/10.7837/kosomes.2023.29.7.770

비대칭형 태풍 특성을 고려한 해상풍 산정

김혜인* · 조완희**† · 문종윤***
* ㈜해양정보기술 연구원, ** ㈜해양정보기술 연구소장, *** ㈜해양정보기술 전무

Calculating Sea Surface Wind by Considering Asymmetric Typhoon Wind Field

Hye-In Kim* · Wan-Hee Cho**† · Jong-Yoon Mun***
* Researcher, Marine Information Technology Corp., Seoul 08592, Korea
** Research Director, Marine Information Technology Corp., Seoul 08592, Korea
*** Executive Director, Marine Information Technology Corp., Seoul 08592, Korea

요 약 : 해상풍은 대기-해양의 상호작용을 이해하는데 중요한 요소일 뿐만 아니라, 해양에서 기인하는 위험기상을 예측하는데 중요한 입력자료이다. 정확한 예측을 위해서는 정확한 해상풍 자료가 요구되지만, 육상과 달리 해상은 관측이 제한적이기 때문에 관측 자료가 많지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 장기간의 고해상도 해상풍 자료 구축을 목표로 하였다. 먼저 장기간에 대해 활용 가능한 ERA5 재분석 바람장을 고해상도로 재격자화 하였고, 재격자화 한 ERA5 바람장을 수치모형 ADCIRC (ADvanced CIRCulation model)의 GAHM (Generalized Asymmetric Holland Model)을 이용하여 산출한 비대칭형 태풍 바람장과 합성하였다. 산출된 비대칭형 태풍 합성 바람장은 기상청 (Korea Meteorological Administration, KMA) 및 일본 기상청 (Japan Meteorological Administration, JMA) 관측자료를 이용하여 정확도를 평가하였다. 평가결과, ERA5 바람장 및 Holland 식을 이용하여 산출한 대칭형 태풍 합성 바람장보다 비대칭형 태풍 합성 바람장이 관측값을 매우 유사하게 재현하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 생산한 해상풍 자료는 향후 폭풍해일 후측 자료 구축, 폭풍해일고 빈도 분석, 해상풍 빈도 분석 등 다양한 연구의 기초자료로 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

핵심용어 : 해상풍, 비대칭 태풍, ERA5, GAHM, JTWC 최적 경로

Abstract : *Sea surface wind is an important variable for elucidating the atmospheric-ocean interactions and predicting the dangerous weather conditions caused by oceans. Accurate sea surface wind data are required for making correct predictions; however, there are limited observational datasets for oceans. Therefore, this study aimed to obtain long-period high-resolution sea surface wind data. First, the ERA5 reanalysis wind field, which can be used for a long period at a high resolution, was regridded and synthesized using the asymmetric typhoon wind field calculated via the Generalized Asymmetric Holland Model of the numerical model named ADvanced CIRCulation model. The accuracy of the asymmetric typhoon synthesized wind field was evaluated using data obtained from Korea Meteorological Administration and Japan Meteorological Administration. As a result of the evaluation, it was found that the asymmetric typhoon synthetic wind field reproduce observations relatively well, compared with ERA5 reanalysis wind field and symmetric typhoon synthetic wind field calculated by the Holland model. The sea surface wind data produced in this study are expected to be useful for obtaining storm surge data and conducting frequency analysis of storm surges and sea surface winds in the future.*

Key Words : *Sea surface wind, Asymmetric typhoon, ERA5, Generalized Asymmetric Holland Model, JTWC best track*

1. 서 론

해상풍은 대기와 해양의 상호작용을 이해하는데 매우 중요한 요소로서, 다양한 해양모델 뿐만 아니라 파랑 및 태풍 해일과 같은 해양 위험기상을 예측하는데 입력자료로 사용되어야 하는 중요한 변수이다. 해양에서 발달하는 대기 현상을 정확하게 모의하기 위해서는 해상풍의 정확한 산출이 선행되어야 하며(Heo et al., 2008), 시간이 지날수록 심화되고 있는 기후변화에 따른 해양환경의 변화가 해상풍의 변화에 의존한다는 연구결과 역시 정확한 해상풍 자료의 중요성을

* First Author : khi95@mitkorea.com, 02-2029-7871
† Corresponding Author : peacewings@mitkorea.com, 02-2029-7871

강조하고 있다(Graf et al., 1998; Xie et al., 2010). 또한, 해상풍은 해상 구조물 설계를 위한 빈도 분석에 필수적으로 사용되는 입력자료로서, 장기간에 걸쳐 극한 상황이 반영된 관측자료를 사용하는 것이 이상적이다. 그러나 육상과 달리 해상은 관측지점이 많지 않고 관측이 제한적이기 때문에 해상에서 연속적인 장기간의 관측자료를 확보하기는 어려운 실정이며, 해양 부이와 같은 정점 자료는 고정된 정점에서 일정한 시간 간격의 해상풍을 관측할 수 있다는 장점이 있지만, 해상풍의 공간적 분포를 고려하는데 한계가 있다(Banzon et al., 2010).

해양 관측자료의 이러한 한계를 극복하기 위해 육상의 관측소 자료를 사용하거나, 태풍 시뮬레이션 모델을 통해 산출한 바람장을 사용하는 등 다양한 방법의 해상풍 산출 연구들이 수행되었다. Kim et al.(2012)와 Lee and Kim(2013)은 MCP(Measure-Correlate-Predict) 방법을 적용하여 육상의 관측탑 자료로부터 기준풍속을 추정하였다. MCP 방법이란 단기 풍속 자료와 인근 육상의 장기 풍속 자료의 관계성을 이용하여 장기 풍속을 추정하는 기법이다. 그러나 이 방법은 두 지점 사이의 거리가 멀거나, 태풍으로 인한 육상 자료의 결측 시 태풍 특성을 반영하기 어렵다는 한계가 있으며(Ko et al. 2014), 단기간 측정자료를 장기간으로 보정하는 것이기 때문에 불확실도가 증가한다(Seo et al., 2010; Kim et al., 2021). 또한, 해상풍에 대한 자료동화 수행 시 육상 관측소 자료를 사용할 경우 육상만큼 정확하게 이루어지지 않는다(You et al., 2007). Ko et al.(2014)은 Holland 식을 사용하여 한반도 서해안 지역의 극치풍속을 예측하였고, Kwon and Lee(2008)는 서남해안의 극치 풍속을 추정하기 위하여, Lee and Kim(2016)은 해안가 지역의 극치 풍속을 추정하기 위하여 각각 개선된 태풍 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 제시하였다. 그러나 이러한 연구들도 태풍 시기만을 고려하여 극치 분석을 수행하였다는 한계가 있다. 강풍은 주로 태풍에 의해 발생하지만, 태풍 이외에도 국지적 및 계절적으로 발생할 수 있다. 따라서 비태풍 시기의 바람도 고려할 수 있는 해상풍 자료를 생산하여야 한다.

본 연구는 태풍 시기뿐 아니라 비태풍 시기의 바람도 현실적으로 모의할 수 있는 장기간 해상풍 자료를 생산하는 것을 목표로 하였다. 이를 위하여 관측자료의 공백을 극복할 수 있고 장기간에 대해 이용 가능한 재분석 자료를 사용하였다. 정확한 강풍 사례를 예측하기 위해서는 5 km 혹은 그것보다 작은 수평 격자 간격이 필요하기 때문에(Cairns and Corey, 2003), 재분석 자료를 재격자화 하여 고해상도 바람장을 구축하였고, 태풍 시기의 현실적인 바람을 고려하기 위하여 수치모형을 이용한 태풍 바람장을 산출하였다. 열대성 저기압으로부터 발생된 태풍은 북상하면서 초기에는 대칭의 와(vortex) 형태를 보이나 평균적으로 북위 23도 이북에서는 비대칭 형태를 나타내며, 황해에 접어들면서 비대칭성이 강해진다(Suh and Kim, 2012). 따라서 본 연구에서는 일반적으로 태풍 바람장을 대칭형으로 산출하는 Holland 식과 달리, 회귀분석을 통해 태풍 파라미터로부터 도출된 태풍 사분면별 풍속(34, 50, 60 knot) 반경 정보를 적용하여 비대칭형 태풍 특성을 고려한 바람장을 산출하였고, 재격자화 한 재분석 바람장과 비대칭형 태풍 바람장 자료를 합성함으로써 과거 태풍 내습시 공간적 특성과 최대풍속 재현성이 향상된 장기간의 해상풍 자료를 생산하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 재분석 자료

ERA5는 5세대 European Center for Medium-Range Weather Forecasts(ECMWF) 대기 재분석 자료로 2019년 8월 31일에 생산이 중단된 ERA-Interim 재분석 자료를 대체하는 최신 자료이며(Hersbach et al., 2020), ECMWF의 Copernicus Climate Change Service(C3S)에서 제공 중이다. ERA5는 ERA-Interim에 적용한 Integrated Forecasting System(IFS) cycle 31r2 버전보다 시·공간 해상도를 높인 새로운 통합 예보 수치 모델 버전 IFS cycle 41r2를 적용하여 생산하고 있다. ERA5의 공간 해상도는 0.25° × 0.25°(약 31km), 시간 해상도는 1시간 간격으로 ERA-Interim에 비해 대폭 향상되었으며, 대기 물리과정 및 전지구 강수량과 증발량 균형 또한 개선되었다. 자료 기간은 1940년부터 현재까지 제공 중이다. 본 연구에서는 1979년부터 2021년까지의 자료를 사용하였고, 고해상도 해상풍 자료 구축을 위해 NCL Earth System Modeling Framework(ESMF) 소프트웨어를 이용하여 ERA5 자료의 공간 해상도를 0.25° × 0.25°에서 0.05° × 0.05°로 재격자화 하여 사용하였다.

2.2 비대칭형 태풍 바람장

본 연구에서는 태풍 바람장 재현을 위해 수치모형인 ADvanced CIRCulation model(ADCIRC; Luettich et al., 1992)을 사용하여 바람장을 산출하였다. 일반적으로 태풍 바람장 산출 시, Holland 식(Holland, 1980)을 사용하는데, Holland 식은 태풍 중심기압 및 최대풍속, 최대풍 반경 세 가지 파라미터만으로 바람장 분포를 산출할 수 있다는 장점이 있지만, 태풍의 이동속도를 고려한 것 외에는 태풍 구조를 단순한 대칭의 동심원으로 가정하기 때문에 실제 태풍의 비대칭적인 특성을 고려할 수 없다는 한계가 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해, Generalized Asymmetric Holland Model(GAHM)에 회귀식으로부터 산출된 사분면별 태풍 풍속 반경 파라미터를 적용하였다. GAHM(Gao et al., 2013)은 ADCRIC 모델에서 기존 Holland 식 기반으로 개발된 parametric

hurricane meteorological vortex 모델로 비대칭성을 고려한 태풍 바람장을 표현하기 위해 최대풍속이 태풍 방위각에 따라 달라지는 비대칭 경도풍 분포식을 사용한다. 본 연구에서는 ADCIRC의 옵션 NWS=20(GAHM)을 선택하여 수치모의를 수행하였고, 비대칭 바람장 산출을 위해 ADCIRC에서 제공하는 보조 프로그램인 ASWIP.F에 태풍 최적 경로 정보를 넣어 도출한 추가적인 트랙 정보를 입력자료로 사용하였다.

태풍 정보는 미국 합동태풍경보센터(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)에서 제공하는 6시간 간격의 태풍 최적 경로(best track) 자료를 사용하였다. JTWC 태풍 최적 경로 자료에서 태풍 특성을 나타내는 주요 변수인 최대풍속(Vmax), 최대풍속반경(Rmax), 중심기압은 각각 1945년, 2001년, 2001년부터 제공되며, 태풍 풍속별(34, 50, 60 knot) 사분면(NE, SE, SW, NW) 정보는 2001년부터 제공된다.

2001년 이전의 태풍 사분면 정보를 산출하기 위해 최대풍속, 최대풍속반경, 위도 3가지 태풍 파라미터로부터 1차 회귀식을 도출하였다. 회귀식 성능 비교검증은 태풍 사분면 정보가 존재하는 2001년부터 2021년까지의 태풍 최적 경로 자료를 사용하여 수행하였으며, 이 중 80%는 training 데이터, 20%는 test 데이터로 무작위로 선별하였다. 최대풍속반경 정보가 제공되지 않는 2001년 이전은 Willoughby and Rahn(2004) 관계식

$$Rmax = 46.29 \times \exp(-0.0153 \times Vmax + 0.0166 \times lat)$$

을 사용하여 최대풍속반경을 산출하였고, 중심기압 정보가 제공되지 않는 2001년 이전은 최대풍속과 중심기압의 선형 관계식(Knaff and Harper, 2010)

$$Vmax = 4.4 \times (1010 - \text{태풍중심기압})^{0.76}$$

을 이용하여 중심기압을 산출하였다. 도출된 회귀식을 적용하여 1979년부터 2021년까지의 태풍 사분면 정보를 산출하였고 ASWIP.F 프로그램을 이용하여 GAHM의 입력자료로 변환하였다.

상기의 방법으로 산출된 비대칭형 태풍 바람장은 보다 현실적인 태풍 바람장 분포를 재현하지만, 태풍 파라미터만을 이용하여 산출하므로 주변 지형이나 배경 기상장의 영향이 고려되지 못하는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 고해상도로 재격자화 한 ERA5 바람장과 비대칭형 태풍 바람장을 합성하였다. 관측자료를 이용하여 비대칭형 태풍 합성 바람장에 대한 정확도 평가를 수행하였고 비교를 위해 ERA5 바람장 및 ERA5 바람장과 대칭형 태풍 바람장을 합성한 바람장도 함께 평가하였다.

2.3 관측 자료

ERA5 바람장과 합성 바람장의 정확도 평가를 위해 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA) 해양기상부이(KMA 부이) 및 해양기상관측등표(KMA 등표) 자료와 일본 기상청(Japan Meteorological Administration, JMA) 해양부이(JMA 부이) 자료를 사용하였다(Table 1). 1시간 간격의 KMA 부이 및 KMA 등표 풍속 자료와 3시간 간격의 JMA 부이 풍속 자료를 사용하여 한반도 근해에서 각 바람장이 태풍 시기 동안 관측치와 얼마나 유사하게 재현하는지 평가하였다. 태풍은 기상청에서 정의한 한반도 영향 태풍(KMA, 2011)으로 선별하였으며, 태풍 시기는 태풍이 관측지점을 지나갈 때, 각 지점이 최대풍속을 기록한 시점을 기준으로 전후 12시간으로 정의하였다.

ERA5 바람장 및 수치모형으로부터 산출된 태풍 바람장은 10 m 높이의 바람이고, 부이 및 등표의 해상풍 관측 높이는 3.6 m에서 75 m까지 각각 다르기 때문에, 바람장 자료와의 비교를 위해 아래의 식을 사용하여 관측자료의 풍속을 10 m 높이의 풍속으로 변환하였다(De Rooy and Kok, 2004; Oh and Ha, 2005; Jeong et al., 2008).

$$U_{10} = U_H \frac{\ln(10/Z_0)}{\ln(H/Z_0)}$$

여기서 H는 관측지점에서 해상풍을 관측한 높이이며, U_H는 관측 높이 H에서의 풍속, U_{10}은 10 m 높이에서의 풍속이다. Z_0은 거칠기 길이로서 기상청 자료의 경우, 대부분 한반도 연안에 근접해 있는 것을 고려해 연안의 거칠기 길이 값으로 사용되는 10^{-3} m를 적용하였고(Stull, 1988), 일본 기상청 자료는 외해의 거칠기 길이 값으로 사용되는 5×10^{-4} m를 적용하였다(Ha et al., 2007; Jeong et al., 2008).

Table 1. The information of the KMA light house AWS (LB), KMA buoy, and JMA buoy

Observation station		Position (Lon, Lat)	Anemometer height, H(m)
KMA LB	957	126.225°E, 35.9867°N	75
	960	126.6542°E, 33.2233°N	18
	961	127.8578°E, 34.285°N	27.5
KMA Buoy	22101	126.0188°E, 37.2361°N	3.6
	22107	126.0333°E, 33.0833°N	3.9
	22187	127.0228°E, 33.1281°N	3.6
	22189	129.8414°E, 35.3453°N	3.6
JMA Buoy	21002	134.53°E, 37.92°N	8.5
	22001	126.17°E, 28.17°N	8.5

바람장 정확도 평가는 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)와 상관도(Correlation, R)를 이용하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(W_i - O_i)^2}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}(W_i - \overline{W})(O_i - \overline{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(W_i - \overline{W})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \overline{O})^2}}$$

여기서 N은 관측 자료의 개수, W은 재분석 바람장 및 태풍 바람장, 합성 바람장 그리고 O는 관측 자료를 의미한다.

3. 결 과

GAHM의 입력 정보로 사용되는 JTWC 태풍 최적 경로 자료는 2001년 이후부터 태풍 사분면 정보를 제공하기 때문에 2001년 이전의 태풍에 대해서는 태풍 파라미터를 이용하여 사분면 정보를 산정하여야 한다. 2001년 이전의 태풍 사분면 정보를 산출하기 위해, 2001년부터 2021년까지의 태풍 자료 중 최대풍속, 최대풍속반경, 위도 3가지 태풍 파라미터를 이용하여

$$R = a_{const} + a_{lat} \times lat + a_{Vmax} \times Vmax + a_{Rmax} \times Rmax$$

형태의 1차 회귀식을 도출하였다(Table 2). 회귀식 도출에 사용된 사분면별 데이터 개수는 R34(34 knot 반경) 7787, 7764, 7691, 7713개, R50(50 knot 반경) 4858, 4846, 4802, 4829개, R64(64 knot 반경) 3280, 3264, 3248, 3262개이며, 무작위로 데이터의 80%는 training, 20%는 test 데이터로 선별하여 회귀식을 도출하였다.

Table 2. First-order regression formula coefficients by wind speed and typhoon radius

Radius		RAD1	RAD2	RAD3	RAD4
R34	a_{const}	-37.33637	-50.95314	-24.55287	-19.75963
	a_{lat}	2.58529	2.58529	1.48373	1.25536
	a_{vamx}	1.09356	1.09356	0.98147	1.09255
	a_{rmax}	1.04495	1.04495	0.86619	0.91317
R50	a_{const}	-39.26471	-44.13383	-30.27103	-28.92762
	a_{lat}	1.31131	1.52168	0.95394	0.82747
	a_{vamx}	0.68011	0.63654	0.57380	0.65264
	a_{rmax}	0.95121	0.92101	0.80889	0.83326
R64	a_{const}	-23.63874	-25.10070	-19.74761	-16.82173
	a_{lat}	0.78683	0.86295	0.58112	0.43578
	a_{vamx}	0.35646	0.32534	0.30574	0.33837
	a_{rmax}	0.76948	0.76493	0.72527	0.76069

회귀식을 적용하여 산출한 사분면 정보를 JTWC 태풍 최적 경로 자료와 비교한 결과, 사분면별 상관도가 R34는 평균 0.60, R50은 평균 0.59, R64는 평균 0.59로 나타났다. 반면 Holland 식을 사용하여 산출한 사분면 정보를 JTWC 자료와 비교한 결과, 사분면별 상관도가 R34는 평균 0.38, R50은 평균 0.45, R64는 평균 0.46으로, Holland 식보다 회귀식을 적용하여 사분면 정보를 산출하였을 때 모든 분면 및 풍속에서 재현성이 더 뛰어난 것으로 나타났다(Table 3).

Table 3. Comparison of Correlation and RMSE of typhoon radius calculated by regression formula and typhoon radius calculated by Holland model indicated by comparison with JTWC best track data from 2001 to 2021

Method		Corr./RMSE(nm)			
		RAD1	RAD2	RAD3	RAD4
Regression	R34	0.59/33	0.64/30	0.59/29	0.56/32
	R50	0.58/20	0.61/18	0.60/16	0.57/18
	R64	0.58/11	0.61/10	0.57/9	0.60/9
Holland	R34	0.36/54	0.37/52	0.42/54	0.37/53
	R50	0.40/28	0.46/27	0.50/27	0.44/27
	R64	0.43/16	0.48/17	0.48/19	0.44/17

도출된 회귀식을 적용하여 1979년부터 2021년까지의 태풍 사분면별 반경 정보를 계산하였고, ASWIP 모듈을 이용하여 GAHM의 입력자료인 강풍반경 파라미터를 산출하였다. GAHM을 이용하여 산출한 비대칭형 태풍 바람장의 공간 해상도는 0.05°×0.05°로 재격자화 한 ERA5 바람장의 격자 정보와 동일하게 적용하였으며, 시간 해상도는 1시간 간격이다.

ERA5 바람장은 태풍 시기 풍속 및 연간 최대풍속이 약하게 나타나는 한계가 있으며(Yoon et al., 2020; Kwon et al., 2020; Kim et al., 2021), 수치모의를 통해 산출된 비대칭형 태풍 바람장은 태풍 파라미터만을 이용하여 산출되기 때문에 태풍 외곽 바람장을 현실적으로 모의하지 못하고 주변 기상장 또한 고려되지 못하는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 각 바람장의 한계를 극복하기 위해, ERA5 바람장과 비대칭형 태풍 바람장을 합성(이하 비대칭형 태풍 합성 바람장)하여 과거 태풍을 현실적으로 모의하면서 장기간에 대해 사용 가능한 해상풍 자료를 생산하였다. 바람장 합성은 ERA5 바람장의 풍속과 비대칭형 태풍 바람장의 풍속을 격자마다 비교한 뒤, 값이 더 큰 바람장의 격자값을 선택하는 방법으로 수행하였다.

ERA5 바람장 및 비대칭형 태풍 합성 바람장의 정확도를 평가하기 위해 기상청에서 정의한 한반도 영향 태풍 중 HOLLY(8410), KOMPASU(1007), CHABA(1618), MAYSAK(2009)

4개의 태풍을 선정하여 각 태풍 시기의 KMA 및 JMA 관측 자료와 비교하였다. 비교를 위해 ERA5 바람장과 Holland 식을 이용하여 산출한 대칭형 태풍 바람장을 합성한 바람장(이하 대칭형 태풍 합성 바람장)도 함께 평가하였다. 태풍이 한반도 인근의 관측지점을 통과할 때, 각 지점이 최대풍속을 기록한 시점을 기준으로 전후 12시간에 대하여 비교하였으며, 한반도 영향 태풍은 태풍 중심이 32-40°N, 120-138°E 영역 이내에 들고, 한반도에 영향을 준 태풍을 기준으로 한다(KMA, 2011). Fig. 1은 선정된 태풍의 이동경로 및 분석에 사용된 태풍 경로 주변의 관측지점을 도시한 것이다.

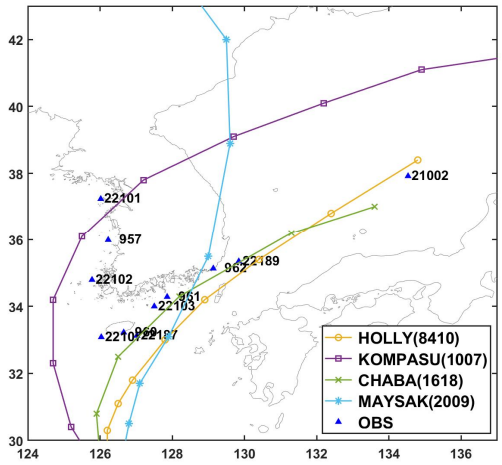

Fig. 1. Typhoon tracks of the HOLLY (8410), KOMPASU (1007), CHABA (1618), MAYSAK (2009) and Locations of Observation station.

Fig. 2는 1984년에 발생한 10호 태풍 HOLLY의 8월 21일 12시 시점, Fig. 3은 2016년 발생한 18호 태풍 CHABA의 10월 5일 00시 시점의 ERA5 바람장과 비대칭형 태풍 합성 바람장을 도시한 것이다. 태풍 HOLLY는 역대 초대형 태풍 중 한반도에 가장 근접한 태풍으로 대한해협을 통과한 유일한 초대형 태풍이며, 태풍 CHABA는 10월에 한반도에 상륙했던 태풍 중 가장 강한 태풍이다. 그러나 ERA5 바람장은 두 태풍 모두 태풍 중심의 최대풍속을 약하게 모의하는 것을 확인할 수 있다. 반면 비대칭형 태풍 합성 바람장은 이러한 문제점이 보완되고 태풍 바람뿐만 아니라 태풍 외곽 바람장까지 고려된 것을 확인할 수 있다.

HOLLY 시기에 대해 분석한 결과, JMA 부이 21002 지점 자료와의 상관도가 ERA5 바람장과 대칭형 태풍 합성 바람장은 0.51, 비대칭형 태풍 합성 바람장은 0.48로 비대칭형 태풍 합성 바람장이 더 낮게 나타났지만, RMSE는 2.6 m/s로 가장 낮게 나타났다. 2001년 이전 태풍이기 때문에 회귀식을 통해 산정된 태풍 사분면 정보를 이용하여 비대칭형 바람장을 산출하였는데, 비대칭형 태풍 합성 바람장이 RMSE 뿐만 아니라 관측자료의 최대풍속과의 차이 또한 가장 작게 나타난 것을 확인할 수 있다(Fig. 4).

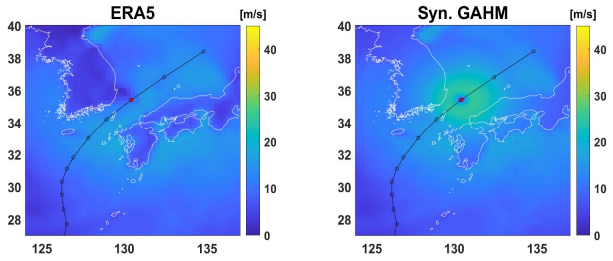

Fig. 2. Comparison of wind fields for Typhoon HOLLY at 12:00 (UTC) on 21 Aug. 1984 : (left) ERA5 reanalysis, (right) asymmetric synthesized wind (Syn. GAHM).

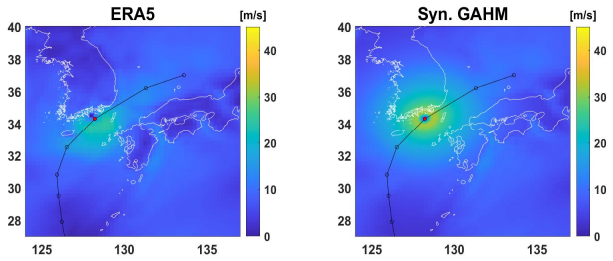

Fig. 3. Comparison of wind fields for Typhoon CHABA at 00:00 (UTC) on 5 Oct. 2016 : (left) ERA5 reanalysis, (right) asymmetric synthesized wind (Syn. GAHM).

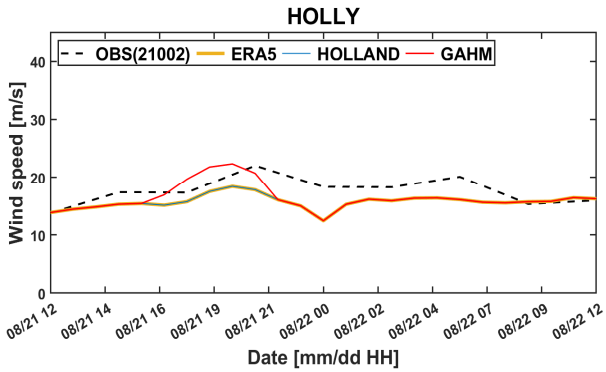

Fig. 4. Comparison of wind speed among observation, ERA5 reanalysis, symmetric synthesized wind (Holland), asymmetric synthesized wind (GAHM) during the passage of Typhoon HOLLY at JMA buoy (21002).

KOMPASU 시기에 대해 분석한 결과, 서수도(957) 지점 자료와의 RMSE가 ERA5 바람장은 2.34 m/s, 대칭형 태풍 합성 바람장은 4.41 m/s, 비대칭형 태풍 합성 바람장은 1.99 m/s로 비대칭형 태풍 합성 바람장이 가장 낮게 나타났다. 관측자료와의 상관도는 대칭형 태풍 합성 바람장이 0.97로 더 높게 나타났지만, 관측자료가 최대풍속을 기록하는 시점 즉, 태풍이 부이를 지나갈 때 관측값보다 강하게 모의하는 경향을 보였으며, 반면 비대칭형 태풍 합성 바람장은 관측값과 매우 유사하게 나타났다. 덕적도(22101) 지점 자료와의 RMSE도 ERA5 바람장은 3.75 m/s, 대칭형 태풍 합성 바람장은 2.76 m/s, 비대칭형 태풍 합성 바람장은 2.57 m/s로 비대칭형 태풍 합성 바람장이 가장 낮게 나타났으며, 상관도 또한 0.93으로 가장 높게 나타났다(Fig. 5).

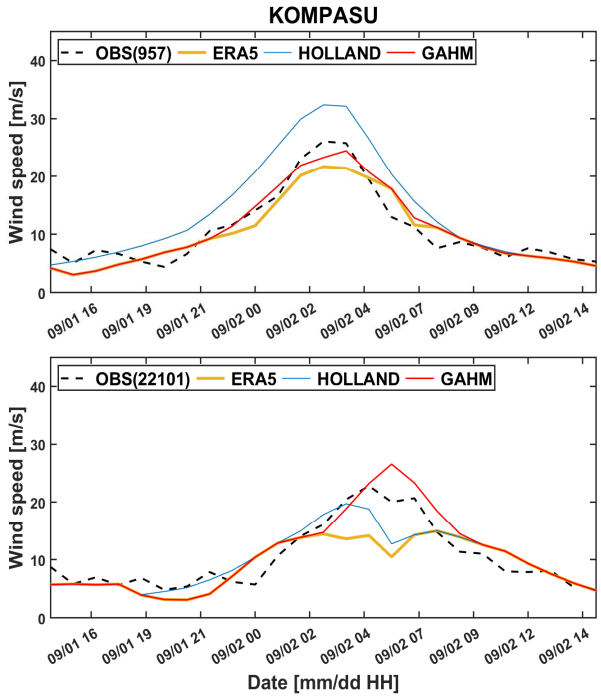

Fig. 5. Comparison of wind speed among observation, ERA5 reanalysis, symmetric synthesized wind (Holland), asymmetric synthesized wind (GAHM) during the passage of Typhoon KOMPASU at Seosudo (957), Deokjeokdo (22101).

CHABA 시기에 대해 분석한 결과, 지귀도(960) 지점 자료와의 RMSE가 ERA5 바람장은 8.17 m/s, 대칭형 태풍 합성 바람장은 6.08 m/s, 비대칭형 태풍 합성 바람장은 4.76 m/s로 비대칭형 태풍 합성 바람장이 가장 낮게 나타났다. 관측자료와의 상관도는 대칭형 태풍 합성 바람장이 0.91로 가장 높게 나타났지만, 관측자료가 최대풍속을 기록하는 시점에 대해 비대칭형 태풍 합성 바람장의 재현성이 더 높은 것을 확인할 수 있다. 간여암(961) 지점도 상관도는 ERA5 바람장과 대칭형 태풍 합성 바람장이 더 높게 나타났지만, 비대칭형 태풍 바람장이 RMSE는 3.85 m/s로 가장 낮게 나타났으며 20m/s 이상의 강한 풍속을 잘 재현하는 것으로 나타났다. 마라도(22107) 지점 자료와의 상관도는 바람장 모두 0.94로 동일하게 나타났지만, RMSE는 비대칭형 태풍 바람장이 2.57 m/s로 가장 낮았다(Fig. 6).

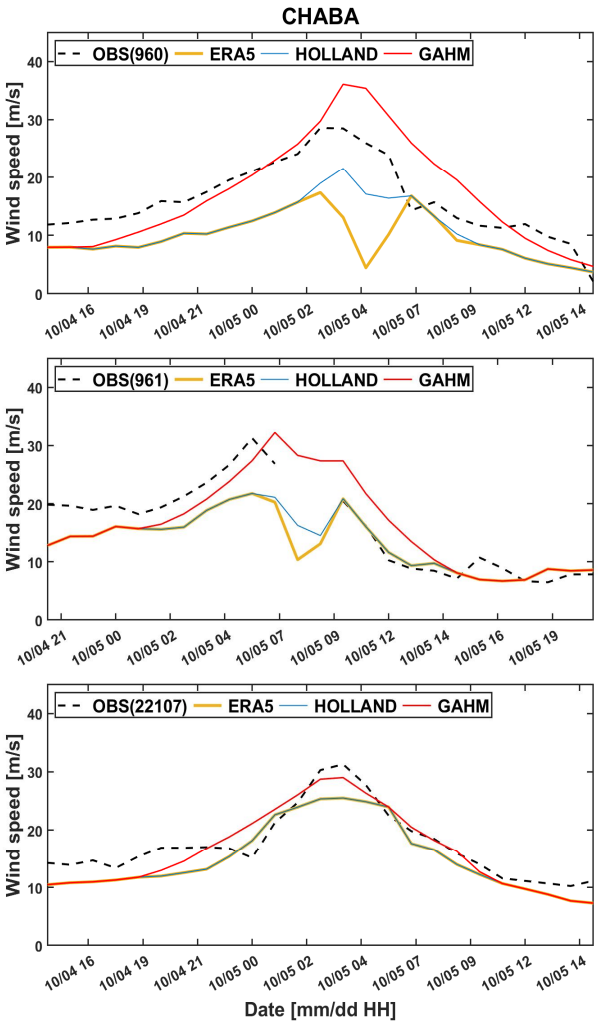

Fig. 6. Comparison of wind speed among observation, ERA5 reanalysis, symmetric synthesized wind (Holland), asymmetric synthesized wind (GAHM) during the passage of Typhoon CHABA at Jigwido (960), Ganyeoam (961), Marado (22107).

마지막으로 MAYSAK 시기에 대해 분석한 결과, 지귀도(960) 지점 자료와의 RMSE가 ERA 바람장과 대칭형 합성 바람장은 7.32 m/s, 비대칭형 합성 바람장이 4.31 m/s로 가장 낮게 나타낮고, 서귀포(22187) 지점 자료와의 RMSE도 ERA5 바람장은 4.74 m/s, 대칭형 태풍 합성 바람장은 4.68 m/s, 비대칭형 태풍 합성 바람장은 3.74 m/s로 비대칭형 태풍 합성 바람장이 가장 낮게 나타났다. 상관도 또한 0.85로 비대칭형 태풍 합성 바람장이 가장 높게 나타났다. 울산(22189) 지점 자료와의 상관도는 바람장 모두 0.90으로 동일하게 나타났지만 RMSE는 비대칭형 바람장이 2.98 m/s로 가장 낮게 나타났다(Fig. 7).

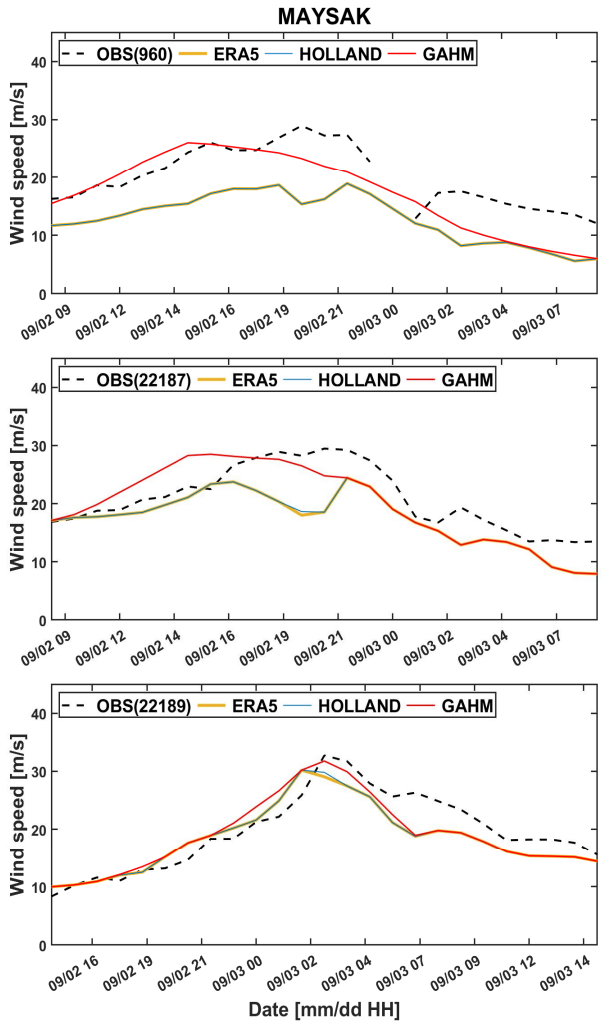

Fig. 7. Comparison of wind speed among observation, ERA5 reanalysis, symmetric synthesized wind (Holland), asymmetric synthesized wind (GAHM) during the passage of Typhoon MAYSAK at Jigwido (960), Seoqwipo (22187), Ulsan (22189).

이상 3가지 바람장의 정확도 평가를 위해 KMA 및 JMA 관측자료와 비교한 결과, ERA5 바람장은 태풍 통과 전후 시점의 풍속이 관측자료에 비해 약하게 나타났고 대칭형 태풍 합성 바람장은 ERA5 바람장과 비슷하게 나타나거나 과대모의 하는 경향을 보였다. 반면, 비대칭형 태풍 합성 바람장은 관측자료의 풍속 시계열을 가장 유사하게 재현하였다.

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 고해상도 해상풍 자료 구축을 위하여 ERA5 재분석 자료를 고해상도로 재격자화 하였으며, 재분석 바람장의 태풍 시기 풍속이 약하게 나타나는 문제점을 보완하기 위하여 수치모형인 ADCIRC를 이용하여 산출한 태풍 바람장을 ERA5 바람장과 합성하였다.

태풍을 대칭의 동심원으로 가정하는 Holland 식과 달리, 본 연구에서는 ADCIRC 내 기존 Holland 식을 변형하여 태풍의 비대칭성을 고려하는 GAHM 모델을 사용하였다. GAHM 모델의 입력자료로 JTWC 태풍 최적 경로에서 제공하는 태풍 풍속별(34, 50, 60 knot) 사분면(NE, SE, SW, NW) 정보를 이용하여 태풍 바람장을 산출하였다. JTWC는 태풍 사분면 정보를 2001년부터 제공하기 때문에 2001년 이전 기간의 정보를 산출하기 위해 최대풍속, 최대풍속반경, 위도 3가지 태풍 파라미터를 이용하여 1차 회귀식을 도출하였으며, 도출된 회귀식을 적용하여 1979년부터 2000년 기간의 태풍에 대한 사분면 정보를 산출하였다. ERA5 바람장과 비대칭형 태풍 바람장의 합성은 격자마다 두 바람장의 풍속값을 비교한 후, 값이 더 높은 바람장 자료를 사용하는 방법으로 수행하였다. 비대칭형 태풍 합성 바람장의 정확도 평가는 KMA 및 JMA 관측 자료를 이용하여 평가하였으며, ERA5 재분석 바람장 및 기존 Holland 식을 이용하여 산출한 대칭형 태풍 합성 바람장과 함께 비교하였다. 평가결과 태풍 중심이 부이 지점을 지나갈 때를 비롯하여 관측값이 20 m/s 이상의 강한 풍속을 기록하였을 때 비대칭형 태풍 합성 바람장이 관측값과 비슷하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 1979년부터 2021년, 총 43년 기간의 ERA5 자료와 동기간 발생한 태풍에 대하여 산출한 비대칭형 태풍 바람장을 합성하였다. 해상은 육상에 비해 관측이 제한적이기 때문에 장기간 관측자료 확보가 어려운 실정이다. 따라서 본 연구는 장기간에 대해 이용 가능하며, 태풍의 비대칭성이 고려된 현실적인 바람장을 생성하였다는데 의의가 있다. 또한, 본 연구에서 생산한 바람장 자료는 향후 비대칭형 태풍 특성을 반영한 폭풍해일 후측 자료 구축 및 폭풍해일 후측 자료의 빈도별 해일고 분석, 해상 구조물 설계를 위한 해상풍 빈도 분석 등의 연구를 위한 기초자료로 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원(과제 번호 : 20220180, 2022년도 해양 기후변화 진단 및 장기전망 연구사업, 월파 정량 관측 기술 개발)을 받아 수행되었습니다.

References

[1] Banzon, V. F., R. W. Reynolds, and T. M. Smith(2010), The role of satellite data in extended reconstruction of sea surface temperatures, Proceedings: “Oceans from Space” Venice, 2010, 27-28.

[2] Cairns, M. M. and J. Corey(2003), Mesoscale model simulations of high-wind events in the complex terrain of Western Nevada, Weather and Forecasting, Vol. 18, pp. 249-263.

[3] De Rooy, W. and K. Kok(2004), A combined physical statistical approach for the downscaling of model wind speed, Weather Forecasting, Vol. 19, No. 3, pp. 485-495.

[4] Gao, J., R. Luettich, and J. Fleming(2013), Development and initial evaluation of a generalized asymmetric tropical cyclone vortex model in ADCIRC, Proceedings of the ADCIRC Users Group Meeting, Vicksburg, MS, USA, Vol. 16.

[5] Graf, J. E., W. Y. Tsi, and L. Jones(1998), Overview of QuikSCAT mission-a quick deployment of a high resolution, wide swath scanning scatterometer for ocean wind measurement, Proceedings IEEE Southeastcon ‘98’ Engineering for a New Era’, pp. 314-317.

[6] Ha, K. J., H. M. Oh, and J. S. Shim(2007), Meteorological Application of Observational Data at Ieodo Ocean Science Platform, The 1st Proceedings of Ieodo Research, pp. 79-84.

[7] Heo, K. Y., J. W. Lee, K. C. Jun, K. S. Park, and K. J. Ha(2008), Model Optimization for Sea Surface Wind Simulation of Strong Wind Cases, Journal of Korean Earth Science Society, Vol. 29, No. 3, pp. 263-279.

[8] Hersbach, H. and Coauthors(2020), The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 146, pp. 1999-2049.

[9] Holland, G. J.(1980), An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes, Monthly Weather Review, Vol. 108, pp. 1212-1218.

[10] Jeong, J. Y., J. S. Shim, D. K. Lee, I. K. Min, and J. I. Kwon(2008), Validation of QuikSCAT wind with resolution of 12.5 km in the vicinity of Korean Peninsula, Ocean Polar Research, Vol. 30, No. 1, pp. 47-58.

[11] Kim, H. G., B. Y. Kim, Y. H. Kang, and Y. C. Ha(2021), Estimation of Reference Wind Speeds in Offshore of the Korean Peninsula Using Reanalysis Data Sets, New and Renewable Energy, Vol. 17, No. 4, pp. 1-8.

[12] Kim, J. Y., K. Y. Oh, and J. S. Lee(2012), An estimation of extreme wind speed according to return periods of demonstration offshore wind farm in the southern part of west sea, Wind Energy, Vol. 3, No. 1, pp. 10-18.

[13] Knaff, J. A. and B. Harper(2010), KN1: Tropical cyclone surface wind structure and wind-pressure relationships, 7th International Workshop on tropical cyclones, p. 79.

[14] Ko, D. H., S. T. Jeong, H. Y. Cho, and K. S. Kang(2014), Extreme offshore wind estimation using typhoon simulation, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 26, No. 1, pp. 16-24.

[15] Korea Meteorological Administration(2011), Typhoon white book (in Korean).

[16] Kwon, K. K., M. H. Jho, K. H. Ryu, and S. B. Yoon(2020), Analysis of Reliability of Weather Fields for Typhoon Sanba (1216), Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 32, No. 6, pp. 465-480.

[17] Kwon, S. D. and J. H. Lee(2008), Estimation of extreme wind speeds in southern and western coasts by typhoon simulation, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 28, No. 4A, pp. 431-438.

[18] Lee, S. L. and S. W. Kim(2013), Estimation of basic wind speed at bridge construction site based on short-term measurements, Journal of Civil and Environmental Engineering Research, Vol. 33, No. 4, pp. 1271-1279.

[19] Lee, S. S. and G. Y. Kim(2016), Estimation of extreme wind speeds in Korean Peninsula using typhoon monte carlo simulation, Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 29, No. 2, pp. 141-148.

[20] Luettich, R. A., J. J. Westerink, and N. W. Scheffner(1992), ADCIRC : an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and esturies. report 1 : Theory and methology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL, Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

[21] Oh, H. M. and K. J. Ha(2005), Analysis of marine meteorological characteristics at Ieodo ocean research station

from 2003 to 2004, Atmosphere, Vol. 41, pp. 671-680.

[22] Seo, H. S., N. H. Kyong, and H. G. Kim(2010), Analysis on wind characteristics for offshore wind turbine structure design at Waljeong, Jejudo, Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, Vol. 14, No. 3, pp. 161-167.

[23] Stull, R. B.(1988), An introduction to boundary layer meteorology, Kluwer Academic, Dordrecht, p. 670.

[24] Suh, S. W. and H. J. Kim(2012), Typhoon surge simulation on the west coast incorporating asymmetric vortex and wave model on a fine finite element grid, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 24, No. 3, pp. 166-178.

[25] Willoughby, H. E. and M. E. Rahn(2004), Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part I: Observations and evaluation of the Holland (1980) model. Mon, Weather Review, Vol. 132, pp. 3033-3048.

[26] Xie, S. P., C. Deser, G. A. Vecchi, J. Ma, H. Teng, and A. T. Wittenberg(2010), Global warming pattern formation: Sea surface temperature and rainfall, Journal of Climate, Vol.23, No. 4, pp. 966-986.

[27] Yoon, S. B., W. M. Jeong, M. H. Jho, and K. H. Ryu(2020), Analysis of Reliability of Weather Fields for Typhoon Maemi (0314), Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 32, No. 5, pp. 351-362.

[28] You, S. H., J. G. Cho, and J. W. Seo(2007), Comparison of KMA Operational Model RDAPS with QuikSCAT Sea Surface Wind Data, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 19, No. 5, pp. 467-475.

Received : 2023. 10. 20.
Revised : 2023. 11. 28.
Accepted : 2023. 12. 29.